

72999

801

7/9082

7.1

工程电路分析

上册

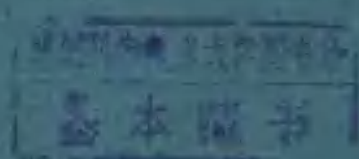
[美] 威廉H. 小海特 杰克B. 肯默利 著

陶民生 李惠庭 等译

邓慎康 校

黄安山 张斯浚

肖杰生



机械工业部部属院校电工基础学科协作组

032

工 程 电 路 分 析

上 册

威 廉 · 亨 特 杰 克 E · 肯 默 利 著
民 宇 惠 庭 等 译 邓 慎 康 校
黄 安 山 张 斯 浣 肖 杰 生

本 页 任 编 辑 肖 杰 生

上 海 机 械 学 院 印 刷 厂 印 刷

开 本 787×1092 1/16 印 张 18.5 字 数 444,000

1982年6月第1版 1982年10月第1次印刷

印 数 1~3500

内 部 使 用

工 本 费 2.16 元

序 言

本书旨在作为电气工程的初级教程。在许多大学和学院里，这门课程是在物理导论之后或与之同时开设的，而物理导论又多半是从场的方面介绍电和磁的基本概念。但是这样一种基础并不是修这门课的先决条件。由于我们在第一章里讨论（或回顾）了一些必要的电和磁的基本概念，因此，阅读本书的必要条件只要具有微积分的基础知识。电路元件在书中是根据电路方程引出并定义的，而与场有关的问题仅仅附带提及。

作者的意图是使本书可供学生自学；它是为学生而不是为教师写的。每当首次引入新的术语时，总是尽可能给以明确的定义。每章开头介绍基本材料，而后进行详尽的解释。数值实例通常用来导出一般性结果。练习题在大多数小节末尾，它们通常是简单的，但题中几部分的答案并没有按原题求解顺序给出。在各章末尾的习题中，比较难的均按书中阐述材料的一般次序编排。我们偶尔用它们逐步引出一些不大重要或者比较高深的以及下一章将要出现的论题。引出论题并不断重复，这两方面对于整个学习过程都是很重要的。

全书共有227个练习题，每题三个部分。另外，各章末尾共有580个习题。这些题目在这一版中是全新的。

材料选择的一般次序是为了使学生尽可能在最简单的内容里，即作为本书第一篇电阻电路中就学会许多电路分析方法。基本定律、一些定理和基本的网络拓扑知识，可使大多数基本分析方法得到运用。大量的例题和习题因其答案的数学表达式不甚复杂而合理可行。若将这些方法推广到以下各篇比较复杂的电路中去，则为复习和概括提供了方便。本书第一篇用4—6周的时间学完，可视学生的基础和有能力以及课程深度而定。

本书第二篇致力于介绍比较简单的RL、RC和RLC电路在直流激励下的固有响应和全响应，但微分方程的基础知识不作要求。单位阶跃在这一篇中作为重要的奇异函数引入，但是单位脉冲直到第六篇我们更为需要时才作介绍。

第三篇介绍频域概念并开始着重正弦稳态分析的复数运算。此外，这一篇还就与正弦稳态分析有关的平均功率、均方根值和多相电路作了讨论。

第四篇介绍了复频概念并且强调了它在强迫响应和固有响应方面的应用。正弦激励电路全响应的求解则开始把前面三篇的内容联系在一起。

第五篇首先考虑基本上属于一种二端口现象的电磁耦合，接着按逻辑关系考虑二端口网络分析和各种电子器件的线性模型。

第六篇介绍了网络分析中更为有效的方法。其中第一种是采用状态变量，这是这次改版中的一个新题目。接下来讨论了周期波形的付立叶级数，随后使用付立叶变换将周期波形的处理方法推广到非周期的强制函数和响应函数。最后一章包括比较重要的拉普拉斯变换方法以及它在求解较复杂电路全响应方面的应用。

本书材料用作一门两学期制的课程绰绰有余，所以可从最后5章或6章中作些选择。本

书包括的材料对于以后的学习无不有着某种价值；而其中信号流图、电路理论和场理论的关系、高深的拓扑概念以及计算机辅助分析细则就是与后续课程有关的一些题目。其目的是要培养学生具有为任何电路正确列写电路方程的能力以及解决不十分复杂的问题并明白解答的能力。

这一版有许多改动，最重要的是增加了论述状态变量的第十七章。虽然这一章的后半部分比本书的其余各章要难些（对数学要求较高），但即使学了头三节也受益非浅。

本书最后为各章之末全部习题的三分之一左右提供了答案，凡是这种习题都标有特殊记号“□”。

本书业已增添设表和推荐程序用以澄清下述一类题目：网孔和节点分析，戴维南等效电路，RL和RC网络的瞬态分析，以及时域频域之比较。在本书许多地方增加了例题和图解并作了进一步阐述。这些部分是：第一章有关符号的约定，第二章的电流和电压分配，第三章的树，第十章的平均功率，第十四章的并联谐振，第十五章的点积规定和第十六章的 $Y-\Delta$ 变换。传递函数的概念在第十三章已有介绍并已将此概念与固有响应联系起来考虑，在付立叶级数材料中已就符号表示作了改进，并在第十四章增加了一篇技术幻想小品。关于二阶RL网络这一节已从第五章中删去。

本书有一种合乎逻辑的内在联系，这就是从定义出发经过解释、描述、图解说明和数值实例以期提高解题能力。作者殷切地期望学生在学习中不断地自问，“为什么会这样？与上周的内容如何联系？按照逻辑下一步该怎么走？”对于低年级工科学生来说，他们有强烈的求知欲望。要使这种好学精神能够持久，可以通过经常布置练习题使他们在正确解题以后明白他们自己智力方面的进步，通过把各节内容联成一个不可分割的整体，通过指出将来的用途和比较先进的技术以及通过使学生一直保持一种感兴趣的、爱寻根究底的态度来实现。

如果本书偶有不合范式或甚至使人轻松之处，这是因为作者认为枯燥乏味或过分死板并非施教所必需。即或学生面露笑意也不致影响他们汲取知识。如果本书文字偶有逗乐之意，读时又何尝不可一乐？

书中许多材料取自加利福尼亚州立大学（位于费勒顿）和普渡大学的授课教程。

在第三版的编写工作开始之前，作者从大约15名评论者的建设性意见中得到了教益，特别是芝加哥伊利诺斯大学的Roger C. Conant教授提供的许多课堂笔记和习题集最为有用。对于加利福尼亚州立大学的Eugene B. Hunt博士允许作者之一离职参与编纂也深表感谢。

威廉 H. 小海特
杰克 E. 肯默利

501

7/9032

T. 1

译 序

美国威廉 H·小海特、杰克 E·肯默利两教授合著的《工程电路分析》一书，自一九六二年第一版问世、一九七二年再版以来，受到了广大读者的欢迎。特别是一九七八年第三版更为人们所称道。原书在保留传统内容的基础上，引进新的概念，浑然一体，匠心别具。教育部工科电工教材编审委员会电路理论及信号分析编审小组组长江泽佳教授曾评介：“此书在美国颇受欢迎，高校工学院选之作教材者不少。原因：一则份量、深度较为适当；二则教学法考究较细，新版习题又全部更新，说明人家是下了功夫的，值得学习。”

当前，我国人民正在为实现四个现代化而努力奋斗，为了在教学中引进新的教材，原一机部电工基础学科协作组于一九八〇年九月首届会议决定将此书译为中文，供教学参考。

值得高兴的是，原书英文本经浙江大学、大连海运学院、陕西机械学院、南京工学院、合肥工业大学、淮南矿业学院、上海机械学院等院校使用后，效果较好。我们相信，这次中译本的出版，将对我国有关课程的教学提供有益的借鉴。

参加本书翻译工作的有：上海机械学院黄安山(序言、第一、二章)、李惠庭(第三、四章)、无锡轻工业学院张斯湜(第五、六章)、合肥工业大学陶民生(第七、八、九章)、邓慎康(第十、十一章)、余世杰(第十二、十三章)以及哈尔滨电工学院孙性如(第十四章)、黄世鹏(第十五章)、于涌源(第十六章)、范建国(第十七章及附录)、周欣荣(第十八章)、宿延吉(第十九章)、朱涤心(第二十章)等同志，全书由邓慎康、肖杰生同志校。限于水平，译文错误之处在所难免，敬请读者批评指正。一九八一年八月，曾在苏州就本书第一至第十二章的译文召开了审稿会议，到会的除原一机部部属院校湖南大学、东北重型机械学院、甘肃工业大学、沈阳机电学院、太原重型机械学院、陕西机械学院、哈尔滨电工学院、合肥工业大学、上海机械学院及轻工业分院的代表以外，还有中国科技大学、北京工业大学、南京工学院、东北电力学院、华北电力学院、四川建筑材料学院、淮南矿业学院、苏州丝绸学院、安徽工学院、鞍钢工学院等的代表，通过分工合作，阅读并讨论了译稿，提出了不少有益的意见。

我们谨对原著者小海特教授及肯默利教授表示感谢。另外，承美国华盛顿大学电机系徐积基教授将本书原文第三版于一九七九年交复旦大学 **徐积功** (1924~1981) 教授带回祖国，由于他们的热情关心，使我们能及早见到此书，谨此一并致谢。

上海机械学院印刷厂及有关同志为排印发行此书付出了辛勤的劳动，谨此表示衷心的感谢。

一九八二年五月

上册目录

译序.....	(i)
序言.....	(i)

第一篇 电阻电路

第一章 定义和单位

1—1 引言.....	(1)
1—2 单位制.....	(2)
1—3 电荷单位.....	(4)
1—4 电流、电压和功率.....	(6)
1—5 电路和电路元件的类型.....	(12)
习题.....	(16)

第二章 欧姆定律和简单电路

2—1 引言.....	(20)
2—2 欧姆定律.....	(20)
2—3 基尔霍夫定律.....	(22)
2—4 单回路电阻电路.....	(27)
2—5 单节点对电路.....	(31)
2—6 电阻和电源组合.....	(33)
2—7 电压和电流分配.....	(37)
习题.....	(39)

第三章 一些有用的电路分析方法

3—1 引言.....	(49)
3—2 节点分析.....	(49)
3—3 网孔分析.....	(56)
3—4 电源变换.....	(62)
3—5 线性和迭加.....	(66)
3—6 戴维南定理和诺顿定理.....	(70)
3—7 树和广义节点分析.....	(77)
3—8 链支与回路分析.....	(82)
习题.....	(87)

第二篇 瞬态电路

第四章 电感和电容

4—1 引言	(97)
4—2 电感器	(97)
4—3 电感器的积分关系式	(101)
4—4 电容器	(105)
4—5 电感和电容的组合	(109)
4—6 对偶性	(114)
4—7 线性及进一步的推论	(117)
习题	(119)

第五章 无源RL与RC电路

5—1 引言	(123)
5—2 简单 RL 电路	(123)
5—3 指数响应的特征	(127)
5—4 更一般的 RL 电路	(129)
5—5 简单 RC 电路	(132)
5—6 更一般的 RC 电路	(135)
习题	(136)

第六章 单位阶跃强制函数的应用

6—1 引言	(142)
6—2 单位阶跃强制函数	(142)
6—3 激励的 RL 电路的初步研究	(146)
6—4 固有响应与强制响应	(149)
6—5 RL 电路	(151)
6—6 RC 电路	(155)
习题	(158)

第七章 RLC电路

7—1 引言	(163)
7—2 无源并联电路	(163)
7—3 过阻尼并联RLC电路	(167)

7—4 临界阻尼	(170)
7—5 欠阻尼并联RLC电路	(173)
7—6 无源串联RLC电路	(177)
7—7 RLC电路的全响应	(180)
习题	(185)

第三篇 正弦分析

第八章 正弦强制函数

8—1 引言	(191)
8—2 正弦曲线的特征	(192)
8—3 正弦强制函数的强制响应	(195)
习题	(198)

第九章 相量概念

9—1 引言	(201)
9—2 复强制函数	(201)
9—3 相量	(205)
9—4 R, L和C各元件上相量关系	(208)
9—5 阻抗	(213)
9—6 导纳	(216)
习题	(217)

第十章 正弦稳态响应

10—1 引言	(221)
10—2 节点、网孔和回路分析	(221)
10—3 迭加, 电源变换和戴维南定理	(224)
10—4 相量图	(226)
10—5 ω 函数响应	(230)
习题	(233)

第十一章 平均功率与均方根值

11—1 引言	(238)
11—2 瞬时功率	(238)
11—3 平均功率	(240)

11—4 电流与电压的瞬时值.....	(248)
11—5 视在功率.....	(250)
11—6 复功率.....	(254)
习题.....	(257)

第十二章 多相电路

12—1 引言.....	(263)
12—2 单相三线系统.....	(266)
12—3 三相Y—Y 连接.....	(269)
12—4 三角形(Δ)连接.....	(274)
12—5 瓦特计的应用.....	(276)
12—6 三相系统的功率测量.....	(278)
习题.....	(284)

第一篇 电阻电路

第一章 定义和单位

1—1 引言

顾名思义，本书是为学习工程电路分析这门学科的人有所造诣而提供的材料。实际上，这一学科对于各类工程师以及对于许多物理学家和应用数学工作者都是极其有用的；它还能促人思考，令人析疑而引人入胜。初学者可能立即会问，“何为电路分析？”问题提得很好。对此，我们浏览一下手头的大学生词典便可从中得到答案。词典释义如下：

工程 使自然界中的物质和能源成为有益于人类的科学。

电路 简单电气装置的互连，其中至少有一条闭合路径可以流通电流。

分析 对复杂实体及各部分相互关系的（数学）研究。

因此，我们可以确定，“工程电路分析”是对于由简单电气装置构成的某种有用互连（其中至少有一条闭合的电流路径）进行数学研究。这一定义是基本正确的，虽然，要到以后我们搞清楚“电流”和“电气装置”的含义才能完全理解。

不久以前，^①一直认为这类教科书是一种仅与电气工程有关的范本。但是现在，土木工程、机械工程和其他工程学科的学生以及应用数学或物理学的临时生跟电气工程师一起研究电路分析导论的现象已日趋普遍。而且甚至在工科学生熟悉某一特殊的工程分支以前，他们已主修了基本上以这一学科为基础的课程。

如果我们已经研究或打算深入研究电气工程这门学科，那末电路分析仅代表我们所选领域中的入门课程。如果我们研究的是某一其他工程分支，那末电路分析可以代表电气工程全部学习内容中的主要部分，而且也能为我们继续学习电子学、仪表测试和其他领域的电气课程打下基础。然而，最重要的是我们有了扩大受教育面的可能性，从而在主要从事某一种电气装置或系统研制的小组中成为比较博识的成员。在这样一个小组中要能进行富有成效的交流，只有当所用语言和定义对大家熟悉时才有可能。

近期的工程成果几乎没有一项能归功于个人。爱迪生式发明家的时代已经过去，毕业工程师应该期望成为由许多工程师、应用数学家和物理学家组成的小组成员。小组力量应由受过技术训练的管理人员协调，技术产品应由经过科学或技术培训的人员生产、销售以及维护操作。今日之工科毕业生不会全都从事工程问题的技术设计工作。现在他们的努力远远超出了创制更好的蒸汽锤和雷达系统的范畴，要他们竭尽全力解决的是诸如空气和水流污染、城市规划、大批量运输、开发新能源以及保护现有自然资源特别是石油和天然气等社会经济问题。

^① 至少以前有两位作者这样认为。

为了有助于这些工程问题的解决，工程师必须掌握许多技术，其中之一就是熟悉电路分析。

下面我们将通过考虑单位制以及几个基本定义和约定开始本篇的学习。为了适合那些不了解基本电磁知识的人的水平，本章中编有基础性的材料。物理导论底子厚的人本章可读得快些，但所有的人都应仔细研读。一旦掌握这些引论之后，我们就可以把注意力转到简单电路上去。

1—2 单位制

我们必须首先建立共同的语言，除非工程师们所用的每一个术语都清楚而明确，否则他们相互之间不能进行有意义的交流。一本教科书对它所介绍的每一个新的量没有加以仔细定义；我们从中就学不到什么，这也确是事实。如果我们在电视商品广告中说得含糊其辞——“能使衣服增白40%”——而不费心去给白度下定义或者提供度量单位，则尽管我们可能推销掉大量洗涤剂，但在工程上我们肯定会因此而受到损失。

为了表示一些可度量之量的数值，我们必须给出**数字**和**单位**，如“3英寸。”幸好，我们都采用同一数制而且对它很熟。对于单位就不是如此，为了熟悉某一种合适的单位制必须花费一些时间，我们必须商定一种标准单位并确信它永久不变且为人们所普遍接受。标准长度单位不应根据某一根橡皮条与两个标记之间的距离来定义，因为这不是永久的，而且每一个人在使用不同的标准。

我们在介绍每一技术术语时也需要对其进行定义，同时根据以前定义的单位 和 量 来 阐述。这里的定义不可能总是象理论上所希望的那样广义。例如，不久将需要定义“电压”。我们或者必须接受一种非常完整和广义的定义（现在我们既不了解也不懂得），或者采用一种不大广义但目前将能满足我们要求的比较简单的定义。到需要比较广义的定义时，熟知某些比较简单的概念届时将有助于我们的理解。

渐趋明显的是，许多量相互联系如此紧密以致已经定义好的第一个量需要后面几个定义的配合才能完全理解。例如，当定义“电路元件”时，根据**电流**和**电压**来定义最为方便，而当定义电流和电压时，根据电路元件的定义又有助于我们这样做。这三个定义在未经阐明前，没有那一个可为人们充分理解。因此，电路元件的最初定义可能有点欠缺，但是我们仍根据电路元件定义电流和电压，最后再回过头来比较仔细地定义电路元件。以后对电磁理论的研究将为我们提供有关电流和电压的更为广义的定义。

关于单位制我们几乎没有选择的余地，我们将使用1964年国家标准局正式通过的一种，它为所有主要的专业性工程协会所使用并且是一种编著当今教科书的语言。这是**国际单位制**（在所有语言中都缩写为SI），在1960年经度量衡总会通过。SI是根据“米、千克、秒、安培、开耳芬度和堪德拉”这六个基本单位制订的。当然，这是“公制”，现在它在世界上大多数技术先进的国家里通用，而且美国也在极力要求采用公制。

下面我们将要看一下有关米、千克、秒和安培的定义。下册附录三之末列出了它们的以及我们将要使用的其他SI单位的标准缩写。在我们的整个讨论中将使用所有这些缩写。

在十八世纪之初，米被精确定义为地极到赤道距离的千万分之一。该距离由业已冷却到

摄氏零度(°C)的铂铱棒上的两条细线标出。虽然尔后比较精确的测量表明,棒上的标记并不恰好代表地球子午线的这一部分长度,但是直到1960年国际上还是承认标记之间的距离为标准米的定义。同年,总会同意将米(m)定义为氪86橙线辐射波长的1,650,763.73倍。这些定义是等同的,但较新的定义更为永久且更易复制。

质量的基本单位,千克(kg),在1901年定义为一铂块的质量,它和标准米棒一起保存在法国塞弗尔的国际度量衡局。这一定义在1960年获得再次肯定。这个铂块的质量大约等于1cm³纯水在4°C时质量的1000倍。

第三个基本单位,秒(S),在1956年以前定义为一个平均太阳日的1/86,400。当时,定义为回归年1900年的1/31,556,925.9747。在1964年,更精确地定义为未受外场微扰的C₁₃原子在基态²S_{1/2}的超精细结构能级F=4, m_F=0和F=3, m_F=0之间过渡频率的9,192,631,770个周期。这后一个定义不但永久而且比前者更易复制;它也只有原子物理学家可以理解。然而,这些定义中的任一定义都充分描述了我们所熟悉的单位,秒。

第四个基本单位,安培(A)的定义将在本章之末待我们比较熟悉电的基本性质之后予以描述。其他两个基本单位,开耳芬度(°K)和坎德拉(cd)与电路分析者没有直接关系。①

SI采用十进制,它把大的单位和较小的单位与基本单位联系起来并用标准词冠表示10的各种不同的幂。这些词冠是:

阿- (a-, 10 ⁻¹⁸)	分- (d-, 10 ⁻¹)
飞- (f-, 10 ⁻¹⁵)	十- (da-, 10 ¹)
皮- (p-, 10 ⁻¹²)	百- (h-, 10 ²)
纳- (n-, 10 ⁻⁹)	千- (k-, 10 ³)
微- (μ-, 10 ⁻⁶)	兆- (M-, 10 ⁶)
毫- (m-, 10 ⁻³)	吉- (G-, 10 ⁹)
厘- (C-, 10 ⁻²)	太- (T-, 10 ¹²)

上表框内表示的那些是电路理论学生最常用的。

这些词冠值得熟记,因为它们在本书和其他科学著作中经常出现。这样,1毫秒(ms)是1秒的1/1000,1千米(km)是1000米。现在很明显,“克”原来是作为质量的基本单位确立的,而“千克”仅代表1000克。现在千克是我们的基本单位,并且如果我们不怕搞混的话,1克可以描述为1毫千克。象毫微秒这样的几个词冠的组合是不能接受的;而应该使用纳秒这一术语。再有,反对正式采用micron(微米)作为10⁻⁶米,正确的术语是微米(μm)。但是埃(Å)可以用作10⁻¹⁰米。

这种10的方幂关系在目前英国通用的所谓英制中却不存在。在从英制转换为普遍采用的公制这一漫长的过渡阶段中,有很多时候,工程分析的结果必须转换成英制以供车间使用或便于与其他人把问题讨论清楚。

① 所有基本单位的完整定义和国际单位制的进一步探讨可以查阅C.H. Page et al. 1960年发表的科技著作《IEEE 频谱》第3卷第3号第169—173页IEEE关于单位的推荐实践。在1971年2月第9次印刷的国家标准局应用数学丛书55《数学函数手册》第2章给出了精确数值。

虽然对于旧制的依赖程度正在逐渐改变,但是我们中间的多数人关于2英寸的概念在心中要比5厘米明确得多。

基本的英制单位根据SI单位制定义如下:1英寸恰好是0.0254米,1磅质量(1bm)恰好是0.45359237千克,至于秒对于两种体制都相同。

作为我们讨论单位中的最后一项,我们考虑用来测量力、功或能量的三种导出单位。牛顿(N)是力的基本单位,^①并且它是以每秒每秒1米(1m/s^2)加速一个1千克质量所需的力。

1牛顿的力等于0.22481磅的力(1bl),质量为68千克的一个十九岁的普遍男子在磅秤上作用的力为670牛顿。

功或能量的基本单位是焦耳(J),定义为1牛顿米(N·m)。施加1牛顿的恒力通过1米的距离需要消耗1焦耳的能量。这与举起我们这一本重约10牛顿的书,通过大约10厘米的距离所需的能量相同。1焦耳等于0.73756英尺磅力(ft·lbI)。

我们自己关心的最后一个导出单位是功率,即做功或能量消耗的速率。功率的基本单位是瓦(W),定义为1焦耳/秒(J/s)。1瓦等于0.73756英尺磅力/秒(ft·lbI/s)。它也等于1/745.7马力(hp),马力是一个在工程术语中逐渐消失的单位。

注:本书练习题在介绍新原理的各节中给出,以便让学生试试自己对基本事实本身的理解如何。习题对熟悉新术语和概念是有用的,所以应该全做。比较综合的习题附在各章之末。习题答案并不按次序列出。例如,在练习题1-1中,答案是(a)0.228(b)52.5(c)0.288。

练习题

1—1 (a)14牛顿的恒力通过16英寸的距离作用____毫秒代表功率25千瓦。(b)一个质量为16磅的滚木球,以速度____分米/秒运动,具有动能100焦耳。(c)一个粒子以光速(≈ 300 兆米/秒)运动,在96纳秒中运动距离____百米。

答案: 52.5, 0.228, 0.288

1—3 电荷单位

在开始讨论电和电路以前,我们可以根据类比定义我们要考虑的这类电现象。当我们握住一个棒球,伸直手臂并将其释放时,我们知道棒球因作用在其上的重力而落地。我们还能够精确地描述它**如何**加速,在任一给定瞬间的速度是**多少**,**何时**到达给定点以及在给定瞬间它将在**何处**。然而我们中间很少有人懂得它**为什么**下落。虽然我们非常明白重力能做什么,但我们不知道它们究竟是什么。

与此类似,电气工程师非常熟悉力、仪表偏转、加热效应和由电引起的其他可度量的响应,但他们很少关心电本身的理论(和哲学)性质。因此,我们的目标是要能够观察电现象,给它们数学描述并付诸实用。我们将只是偶尔关心一下它们的起因。

^① 值得指出,以著名科学家命名的各种单位,其缩写都冠以大写字母。

假设我们取一小块象木髓那样的某种轻质材料并用细丝悬起。如果我们现在用一块绒布摩擦硬橡皮梳子然后用它接触木髓球，我们发现它摆离梳子；在梳子和木髓球之间存在着斥力。在放下梳子后用绒布靠近木髓球，我们可以看到它们之间存在着吸力。

我们把木髓球上的这两种力解释为它们是由于木髓球、梳子和绒布上存在电荷而引起的电力。与此类似，我们认为，作用在棒球上的力是由于棒球和地球重力质量的存在而引起的重力。

但是我们的实验清楚地表明，电力可以是斥力也可以是吸力，在这一点上重力的类比说法不灵了。就我们现在所知，斥力形式的重力并不存在。

我们假设存在两种电荷，而且同性电荷相斥、异性电荷相吸，由此说明吸力和斥力两种电力的存在。我们称这两种电荷为正电荷和负电荷，虽然我们可能曾经把它们称为金色的和黑色的或者玻璃的和树脂的（如许多年前的命名）。再有，本杰明·富兰克林把原来存在于梳子上的电荷随意称为负电，而绒布上的则称为正电。

现在我们可以用这些新的术语来描述我们的实验。用布摩擦梳子，梳子上产生负电荷，布上产生正电荷。用梳子接触木髓球将其所带的一些负电荷转移到木髓球上，木髓球和梳子上同种电荷之间的斥力便使木髓球移开。当我们使带正电荷的绒布靠近带负电荷的木髓球时，两种不同电荷之间的吸力是很明显的。

我们现在已经知道，所有物质是由称为原子的基本单元组成的，而原子又是由不同种类的基本粒子组成的。最重要的三种粒子是电子、质子和中子。电子带负电荷，质子带等量正电荷，中子是中性的或一点也不带电。当我们用绒布摩擦橡皮梳子时，因绒布上的一些电子经摩擦跑到梳子上而使梳子带负电；绒布因缺少电子不能维持电中性而显示正电荷的特性。

上面提到的三种粒子各自的质量已由实验测定。电子的质量是 9.10956×10^{-31} 千克，质子和中子的质量大约为电子的1840倍。

现在我们准备定义电荷的基本单位，以查尔斯·库仑的名字命名，称为库仑。查尔斯·库仑是对两个电荷之间的力进行仔细的定量测量的第一个人。当然，库仑这一单位可按我们希望的任何方式加以定义，只要该定义是方便的、普遍接受的、永久的并且不会与前面的定义发生任何矛盾。但是，这并没有给我们留下任何选择的余地，因为已经有了一个普遍接受的下述定义：两个带有相等电量的点电荷，在真空中相距为1米而斥力为 10^{-7}c^2 牛顿时，每个点电荷所带的电量称为正1库仑或负1库仑(C)，符号c代表光速 2.997925×10^8 米/秒。根据这个单位，一个电子的电荷是 -1.60219×10^{-19} 库仑，因此1库仑(负的)代表大约由 6.23×10^{18} 个电子组成的电荷。

我们将用符号Q或q表示电荷；大写字母表示不随时间变化的或者恒定的电荷，小写字母代表时变电荷这种一般情况。我们常称此为电荷的瞬时值，并且把它写成 $q(t)$ 以强调它和时间有关。大写字母和小写字母这种同样的用法对其他各种电量也都适用。

练习题

1—2 求下列各项代表的电荷(皮库)：(a) 10^7 个电子；(b) 10^8 个电子加 2×10^7 个质子；(c) 在 $t = 0.3$ 秒时， $8e^{-100t}$ 库仑。

1—4 电流、电压和功率

上面讨论的电现象属于静电学的范畴，它研究静电荷的性质。静电学之所以对我们有意义仅仅是因为它是电学的基础并且在定义电荷时有用。然而，在上述实验中，从绒布向梳子或从梳子向木髓球转移电荷的这部分过程，已与静电学的概念有所不同。“转移电荷”或“运动电荷”的概念对我们研究电路是极端重要的，因为电荷在从一个地方运动到另一个地方的过程中，我们也可以把能量从一处输送到另一处。大家熟悉的横穿全国的输电线就是一个实例。

同样重要的是，能否改变电荷的转移速率以便实现通讯或传递信息的目的。这种转移过程是通讯系统，例如无线电、电视和遥测的基础。

运动电荷代表**电流**，下面我们将比较仔细地加以定义。在一条独立路径象金属导线中的电流，就涉及到大小和方向两个量；电流是对电荷沿某一规定方向通过一给定参考点运动速率的度量。现在我们任取一例，但它将使我们得到电流是电荷随时间的变化速率， dq/dt ，这种一般定义。

让我们考察一条电荷可以沿其运动的独立路径，并且提出许多有关电荷沿这条导线或导体以何种方式运动的问题。作为一个第一手观察者，我们将一个非常矮小的学生安在该路径A点，并请他记录自某一参考时间 $t=0$ 起已经通过他的电荷总量。我们请他每秒钟①读数并给他下面这些详细指示：

1. 正方向朝你的右边。
2. 如果正电荷在正方向通过你，加电荷量。
3. 如果正电荷在反方向通过你，减电荷量。
4. 如果负电荷在正方向运动，减电荷量。
5. 如果负电荷在反方向运动，加电荷量。

观察者观察8秒钟，记录数据，然后交给我们一张图，图1—1，其中 q 表示自 $t=0$ 起已经通过他的总电荷。

现在，我们看到可以用许多方法对此结果进行解释。例如，在第1秒，或者是一个单位的正电荷运动到左边或者是一个单位的负电荷运动到右边。对于第2个1秒间隔存在相同的情况。事实上，在上述任一间隔中，观察者可能已经数出100个单位正电荷向右运动，101个向左运动。也许正负电荷都在两个方向运动着。

幸运的是，我们不必知道实际出现的是无限多种可能性中的那一种，每一种情况产生的电效应都是相同的。

现在我们要通过增加测量次数改进这组数据，这就要求计算越来越小的电荷元。最终极限是单个电子具有的电荷量。现在记录的图形可看作一条平滑曲线，见图1—2。

① 他是一个矮小但反应敏捷的学生。

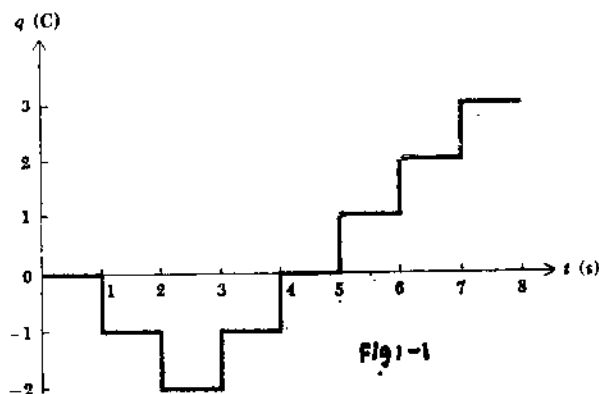


图1—1 自 $t=0$ 起已经通过给定参考点的总电量 q 。
电荷以1秒间隔进行测量

接下来我们准备考察电荷正在转移的速率。在从 t 到 $(t+\Delta t)$ 的时间间隔里,经过参考点转移的电荷已经从 q 增加到 $(q+\Delta q)$ 。如果在这一点曲线下降,则 Δq 是负值。因此,电荷在时间 t 通过参考点的速率非常近似地等于 $\Delta q/\Delta t$,而当间隔 Δt 减小时,该速率的准确值由其导数给出:

$$\frac{dq}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

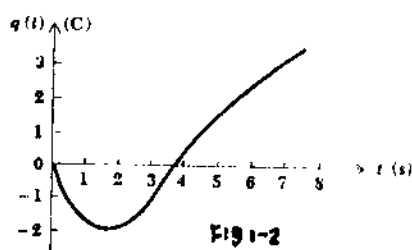


Fig. 1-2

图1—2 自 $t=0$ 起已经通过给定参考点的总电荷 $q(t)$ 的瞬时值

我们将在一个特定点沿规定方向流动的电流定义为净的正电荷沿规定方向通过该点运动的瞬时速率。电流用符号 I 或 i 表示,这样

$$i = dq/dt$$

电流单位是安培(A),它相当于电荷以1库仑/秒的速率在运动。安培是以十九世纪初法国物理学家A.M. Ampère的名字命名的。它通常被称为“安”(amp),但这是非正式和不正规的。

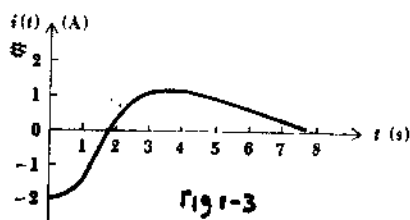


Fig. 1-3

图1—3 瞬时电流, $i = dq/dt$,
其中 q 由图1—2给出

小写字母 i 仍然表示瞬时值。利用图1—2的数据,瞬时电流可由曲线上每点的斜率给出。电流曲线示于图1—3。

在时间 t_0 和 t 之间所转移的电荷可以表示为一个定积分

$$q \Big|_{t_0}^t = \int_{t_0}^t i \, dt$$

在上式中加上直到 t_0 时已转移的电荷 $q(t_0)$ 就得到整个时间内所转移的总电荷

$$q = \int_{t_0}^t i dt + q(t_0)$$

几种不同类型的电流示于图1—4。恒定的电流称为直流电流或简称为直流(dc)，如图1—4a所示。我们将发现许多电流随时间作正弦变化的实际例子，见图1—4b。这种类型的电流，在正规的家用电路常见。这种电流往往称为交流电流或交流(ac)。图1—4c和d所示的指数电流和衰减正弦电流以后也将遇到。

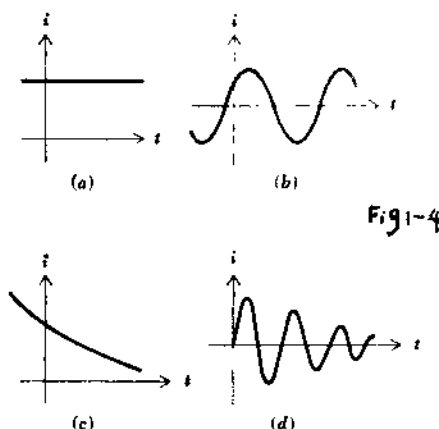


Fig 1-4

图1—4 几种电流：(a)直流(dc)；(b)正弦电流或交流(ac)；(c)指数电流；(d)衰减正弦电流

我们使用在导体附近标箭头的办法规定电流的图示符号。因此，在图1—5a中，箭头方向和电流值“3A”或者表示每秒钟有3库仑净的正电荷向右运动，或者每秒钟有-3库仑净的负电荷向左运动。在图1—5b中又有两种可能性：或者是-3库仑/秒流向左边，或者是+3库仑/秒流向右边。所有四种说法和两个图都表示电效应相等的电流，因此我们说它们是相同的。



Fig. 1-5

图1—5 同一电流的两种表示方法

即使已经知道金属导体中的电流是由于电子运动的结果，然而把电流看作正电荷的运动却是方便的。在电离气体、电解液和一些半导体材料中，运动中带正电的单元构成了部分电流或全部电流。因此，电流的任一规定只有符合于通导电流时的物理性质才是有意义的。我们已经采用的定义和符号是标准的。

我们必须认识到电流箭头并不表示“实际的”电流方向，而只是约定的一部分，这使我们能毫不含糊地谈论“导线中的电流”。箭头是有关电流定义的一个基本组成部分！不规定箭头而谈论一个电流 $i_1(t)$ 之值乃是讨论一个不确定的事物。因此，用图1—6a和b表示 $i_1(t)$ 是无意义的，而图1—6(c)是完全明确的。

下面我们定义电路元件。诸如保险丝、灯泡、电阻器、电池、电容器、发电机和点火线圈等这些电气装置都可以用简单电路元件的组合来表示。开始时我们用一个任意形状的物体表示